

論文 高強度梁主筋を接合部内機械式継手とした十字型接合部の構造性能に関する実験

佐川 隆之^{*1}・迫田 丈志^{*2}・前田 匡樹^{*3}・足立 智弘^{*4}

要旨: SD590, Fc60 を用いた十字型接合部の部分架構実験を行った。試験体はそれぞれ通し配筋の梁主筋に 5-D19 を用いた No.1, No.1 と同様の配筋で接合部内機械式継手を用いた No.2, 梁主筋に 3-D25 を用い付着余裕度が不足する機械式継手のある No.3 の計 3 体で構造性能への影響を検討した。試験体 No.1,2 では、最大耐力発揮時までほとんど違いがなく曲げ終局強度の計算値を上回り、No.3 のみ最大耐力が計算値に届かなかった。試験体 No.1,2 とともに 1/33rad.まではほぼ同等の性能を示した。各性能の比較により、設計段階で十分な付着を確保していれば十字型接合部内に機械式継手を用いても通し配筋と同様に構造性能を評価できることが分かった。

キーワード: SD590, 機械式継手, 十字型接合部, 接合部内梁主筋付着

1. はじめに

近年、大規模集合住宅の高層化、大スパン化、高耐力化、プレキャスト化を目的として高強度鉄筋、高強度コンクリート、また十字型接合部内に機械式継手がいられる。梁主筋SD490とコンクリート設計基準強度Fc60を組み合わせた高強度材料については、これまでの数多くの実験により性能が確認され、実施物件での使用実績も増えている。これに対して、梁主筋がSD590以上の高強度材料は実験が少なく実験データの蓄積も少ないのが現状である。これらの高強度材料を用いた既往の研究¹⁾では、高強度鉄筋を主筋に用いると、普通強度の場合と比較して曲げ降伏時変形が増加することが確認されている。十字型接合部内における梁主筋の付着・定着は、主筋の抜け出しを防止し、曲げ耐力・靱性を確保する上で重要である。機械式継手は表面に異形節がないため、付着性能が低下する可能性が考えられるが、この影響はあまり明らかになっていない。本実験では、梁主筋にSD590, Fc60クラスのコンクリートを用いた十字型接合部の架構実験を行い、現行設計法を直接拡張する形で柱十字型接合部の剛性・耐力の評価が可能かどうか、また、プレキャスト化に伴う接合部内の機械式継手(写真-1)の有無により構造性能に影響が出るか検証を行った。

2. 実験計画

2.1 実験概要

本研究で想定する建物は、地上40階、高さ140m程度の鉄筋コンクリート構造純ラーメン架構とし、梁主筋SD590, Fc60クラスのコンクリートが用いられているその10~15階部分のスパン8m, 階高4.0mの十字型接合部を対象(図-1の応力図部分)とした。部材寸法は柱断面

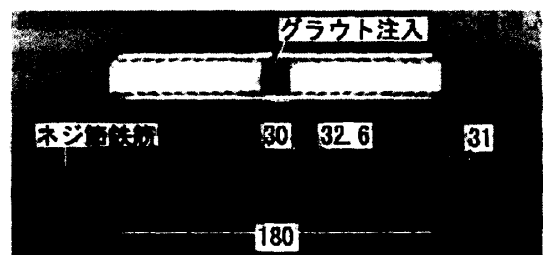


写真-1 機械式継手 (D19 用)

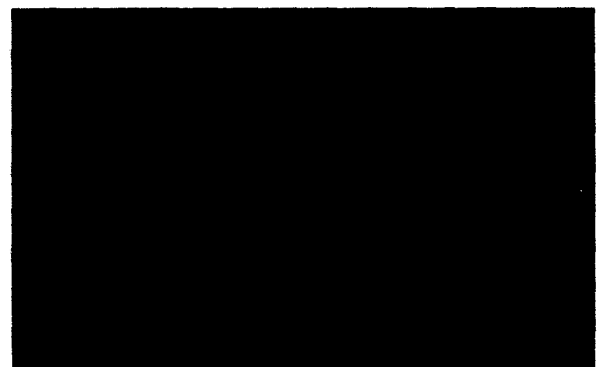


写真-2 載荷状況

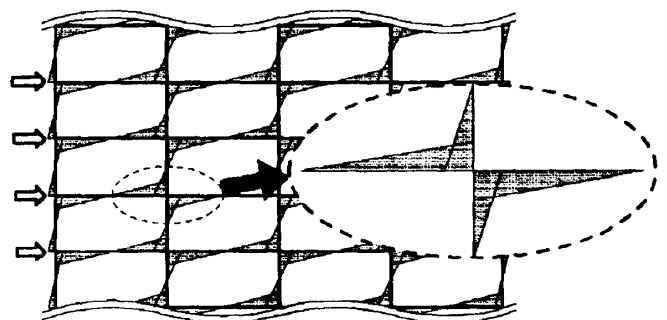


図-1 想定建物の応力図と実験部位

1000×1000, 梁断面 800×1000 の縮尺 1/2.5 として、構造実験を行った。試験体寸法はスパン 3.2m, 階高 1.6m で柱断面 400×400, 梁断面 300×400 とした。

*1 東北大学 大学院工学研究科都市・建築学専攻 大学院生 (正会員)

*2 東北大学 大学院工学研究科都市・建築学専攻 助手 工修 (正会員)

*3 東北大学 大学院工学研究科都市・建築学専攻 准教授 工博 (正会員)

*4 東京鉄鋼(株) 開発部製品開発課 工修 (正会員)

2.2 試験体設計

試験体は3体とし、梁曲げ降伏先行型となるように設計した主筋5-D19の通し配筋試験体(No.1)、主筋5-D19を接合部内で機械式継手を用いた試験体(No.2)、No.2の梁主筋に太径鉄筋3-D25を使用し付着余裕度を低く設定し、接合部内で機械式継手を用いた試験体(No.3)とした。建築学会の「靱性保証型耐震設計指針」²⁾による計算結果を表-1、試験体概要を表-2、試験体配筋を図-4に示す。計算は設計用で規格強度を用いた。また、機械式継手の付着性状は明らかでないため、梁主筋の付着余裕度は継手を無視して、主筋径より求めることとした。

【No.1 試験体】通し配筋・梁曲げ降伏先行型

梁曲げ終局耐力 bQ_{mu} に対する柱の曲げ耐力や梁・柱のせん断耐力の余裕度を1.8~2.0倍程度と確実に梁曲げ降伏先行型となるようにした。接合部のせん断余裕度1.2倍程度、接合部内の付着特性に対する継手の有無の影響を調べるために梁主筋の付着余裕度1.0倍程度と余裕度が小さい範囲に設定した。

【No.2 試験体】機械式継手・梁曲げ降伏先行型

配筋は試験体 No.1 と同じだが、接合部内で梁主筋に機械式継手を用いた。梁主筋同士の芯々間隔は $2.5d_b$ (d_b :主筋径)以上あるが継手間隔は $1.5d_b$ 程度となり、継手端にかかる支圧(図-3)の影響も検討する。

【No.3 試験体】機械式継手・付着破壊先行型

梁主筋をD19より太径D25を用い、曲げ耐力は同程度にそろえて小さい付着余裕度0.76倍で機械式継手を用いた。付着余裕度不足の場合の継手の付着性能への影響を確認する。

2.3 加力計画

加力装置図を下図に示す。鉄骨フレームとRC反力床、壁と油圧ジャッキ5本を組み合わせた加力フレーム中に試験体を設置した。試験体の柱端部、梁端部にピンを設置して加力フレームに組み込んだ。上部2本のジャッキで柱に一定軸力(1440kN:軸力比 $\eta=0.15$)を与え、水平ジャッキにより柱の鉛直を保持した。試験体の梁端に設置した鉛直ジャッキにより左右の梁にせん断力を載荷して、地震時の架構の応力状態を再現した。

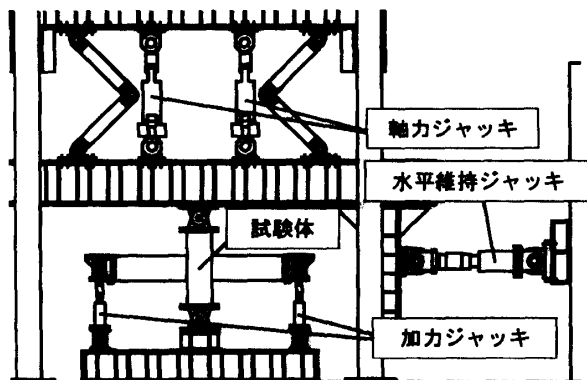


図-5 加力装置

表-1 設計用強度

試験体	梁(kN)		柱(kN)	
	bQ_{mu} :上限	bV_u :信頼	bQ_{mu} :信頼	bV_u :信頼
No.1,2	430	854(1.98)	769(1.78)	849(1.97)
No.3	458	854(1.78)	769(1.68)	849(1.85)
試験体	接合部せん断(kN)		接合部内梁主筋付着(N/mm ²)	
	V_j	V_u	τ_j^*	τ_u^*
No.1,2	1434	1672(1.17)	15.41	15.42(1.00)
No.3	1520	1672(1.10)	20.28	15.42(0.76)
鋼種	信頼強度(N/mm ²)	上限強度(N/mm ²)	* ()内は各余裕度を示す bQ_{mu} : 梁の曲げ終局強度 bV_u^* : $R_u=1/50$ の時のせん断信頼強度 (層せん断力に換算した値)	
SD590	590	650		
SD785	785	/		

$$\text{設計用付着強度 } \tau_j^* = \frac{2\sigma_{ym} \cdot A_s}{\psi \cdot l}$$

$$\text{付着強度 } \tau_j^* = 1.25 \times 0.7(1 + \eta) \sigma_B^{2/3}$$

図-2 接合部内梁主筋の付着

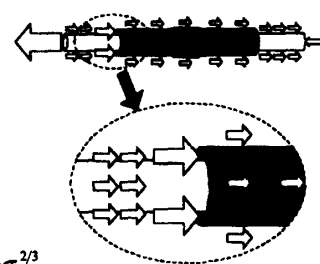


図-3 継手端の支圧

表-2 試験体概要

No.	試験体名称	概略図	備考
1	通し配筋・梁曲げ降伏先行型		梁主筋5-D19 付着余裕度1.00
2	機械式継手・梁曲げ降伏先行型		梁主筋5-D19 付着余裕度1.00
3	機械式継手・付着破壊先行型		梁主筋3-D25 付着余裕度0.76

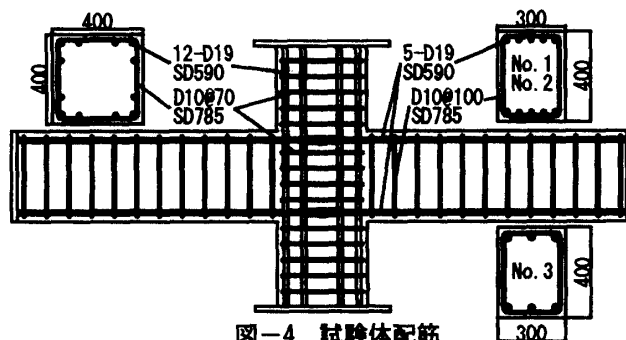


図-4 試験体配筋

表-3 材料試験結果

コンクリート	圧縮強度(N/mm ²)	圧縮強度時歪(μ)	ヤング係数(N/mm ²)	割裂強度(N/mm ²)
設計基準強度	60	68.2	2383	4.48
鉄筋径(鋼種)	降伏点(N/mm ²)	引張強度(N/mm ²)	ヤング係数(×10 ⁵ N/mm ²)	降伏歪(μ)
D19(SD590)	613	833	1.85	3320
D25(SD590)	622	812	1.87	3316
D10(SD785)	854	1011	2.05	4175

2.4 加力スケジュール

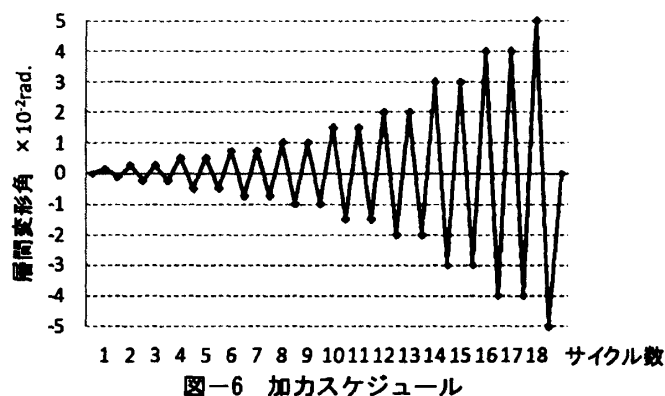
加力は変位制御とし、試験体の左右の梁端の変位を計測しながら、その値を用いた層間変形角により制御した。層間変形角を $R=1/800 \sim 1/20 \text{rad}$ と順次大きくしながら正負繰返し載荷する。図-6 に示すように、加力サイクルは $R=1/800, 1/20 \text{rad}$ を1サイクルのみ、他の各層間変形角において2サイクルの繰返しとした。

3. 実験結果

3.1 破壊状況

各試験体ともに $R=1/800 \text{rad}$ のサイクルで梁曲げひび割れ、 $R=1/200 \text{rad}$ で柱曲げひび割れ、 $R=1/133 \text{rad}$ で接合部せん断ひび割れがそれぞれ発生した。

実際の建物の設計で想定する変形は一般に層間変形角 $1/100 \text{rad}$ 程度であり、ある程度の余裕を考慮しても $R=1/50 \text{rad}$ 程度が実務設計で重要な範囲であることから、まず $R=1/50 \text{rad}$ 以下の挙動を比較した。この範囲で試験体の最大ひび割れは梁端の曲げひび割れであった。 $R=1/100, 66, 50 \text{rad}$ で試験体 No.1 が 0.4, 1.0, 1.8mm, 試験体 No.2 が 0.4, 1.0, 1.8mm, 試験体 No.3 が 0.4, 1.2, 2.0mm となっており、 $R=1/50 \text{rad}$ までは各試験体ともに最大ひび割れ幅の違いはほとんどなかった。また、接合部の各変形角の最大ひび割れ幅もほぼ同様であった。



層間変形角 $1/33 \text{rad}$ 以降の大変形では徐々に試験体ごとの破壊性状の差が出始めた。 $R=1/33 \text{rad}$ では試験体 No.1 は主に梁端でのコンクリートの曲げ圧壊が目立った。試験体 No.2 では No.1 と同様の梁端の曲げ圧壊に加えて、接合部のせん断ひび割れが大きくなった。 $R=1/25 \text{rad}$ で、接合部のひび割れ幅も 3.5mm と No.1 より大きかった(写真-3)。これは、接合部内に機械式継手を設けていることにより継手端部で大きな支圧応力が発生しているためと考えられる。また、接合部中央でのかぶりコンクリートの剥落も顕著であった。試験体 No.3 では継手端部の支圧により発生したひび割れが徐々に縦方向に拡大していき最終的には柱主筋に沿ってかぶりコンクリートが割れ裂かれた。また、継手端の支圧が梁端にも及び、梁端の破壊部分からは接合部内の継手が視認できた。

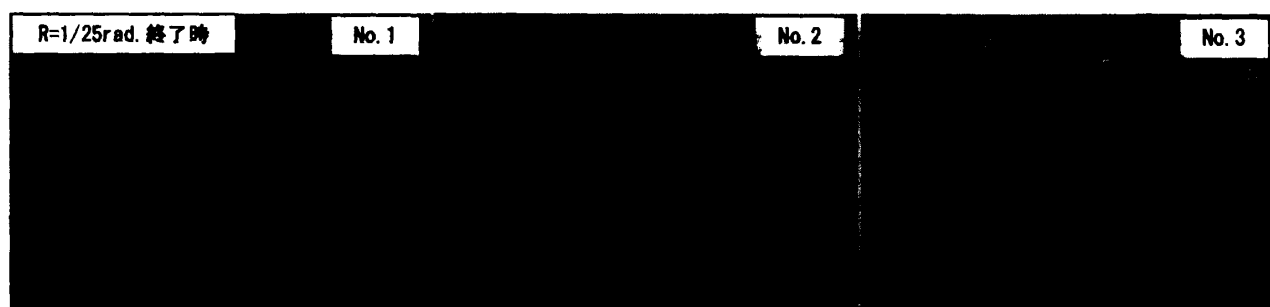
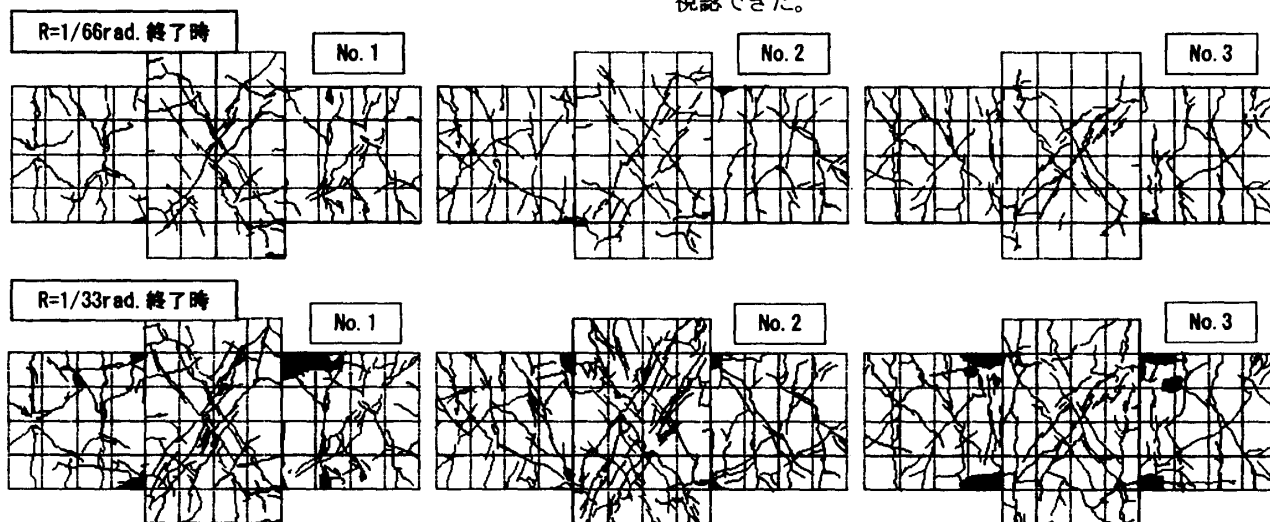


写真-3 ひび割れ状況

3.2 層せん断力-層間変形角関係

試験体No.1～3で $R=1/66\text{rad}$ から梁主筋が降伏し始め、 $R=\pm 1/50\text{rad}$ で歪ゲージを貼った梁主筋はすべて降伏した。通し配筋試験体No.1と機械式継手有りの試験体No.2はともに $R=1/66\text{rad}$ で梁曲げ終局強度計算値に達し、それ以降も耐力が増加し $R=1/33\text{rad}$ で最大耐力を示した（実験値/計算値：No.1：1.10，No.2：1.11）。No.1,2は $R=1/33\text{rad}$ まではほぼ等しい層せん断力-層間変形角関係を示した。試験体No.1では最大耐力以降、耐力低下がはっきりみられた。一方、No.2では $R=1/33\text{rad}$ 以降も耐力低下が少なく最終変形角 $R=1/20\text{rad}$ でも最大耐力の85%と高い耐力を維持した。機械式継手有りの梁主筋付着不足型の試験体No.3は $R=1/50\text{rad}$ で最大耐力を示し、曲げ終局強度計算値には達しなかった（実験値/計算値：No.3：0.98）。No.3も目立った耐力低下は起こらなかった。実験値-計算値比較を表-4に示す。

図-9の包絡線で試験体No.1とNo.2の層せん断力-層間変形角関係を比較すると、 $1/50\text{rad}$ までは違いがなく、 $1/33\text{rad}$ 以降の大変形ではNo.2の方が高い耐力を維持している。No.3も最大耐力の計算値には届かなかったが、耐力低下は小さかった。実験値は $R=1/66\text{rad}$ となり、菅野式による降伏変形角の $1/100\text{rad}$ 程度よりも大きい値となった。これは梁主筋に高強度鉄筋を用いたためと考えられる。

3.3 等価粘性減衰定数

試験体No.1～3の層間変形角 $1/25\text{rad}$ までの各2サイクル目の等価粘性減衰定数を図-10に示す。各試験体とも、層せん断力-層間変形角関係から分かるようにスリップ型なので、それほどエネルギー吸収性能は高くない。すべての試験体で梁主筋の降伏が始まった $1/66\text{rad}$ 以降に等価粘性減衰定数が大きくなっている。各試験体を比較してみると小変形から大変形を通してエネルギー吸収性能にほぼ違いはない。通し配筋の試験体No.1の $R=1/25\text{rad}$ での等価粘性減衰定数は12%程度になっており、機械式継手有りの試験体No.2,3でも同程度の値を示している。このことから、接合部内に機械式継手を用いても、通し配筋の場合と同程度のエネルギー吸収性能を持つと考えられる。

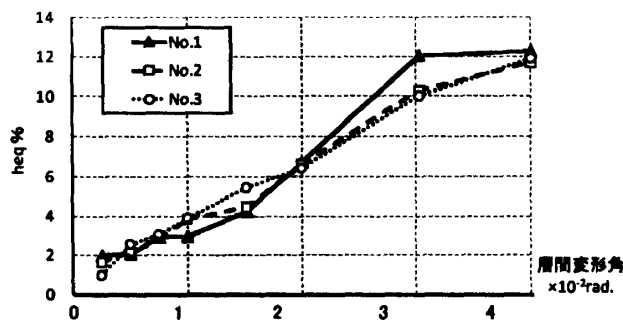


図-10 等価粘性減衰定数

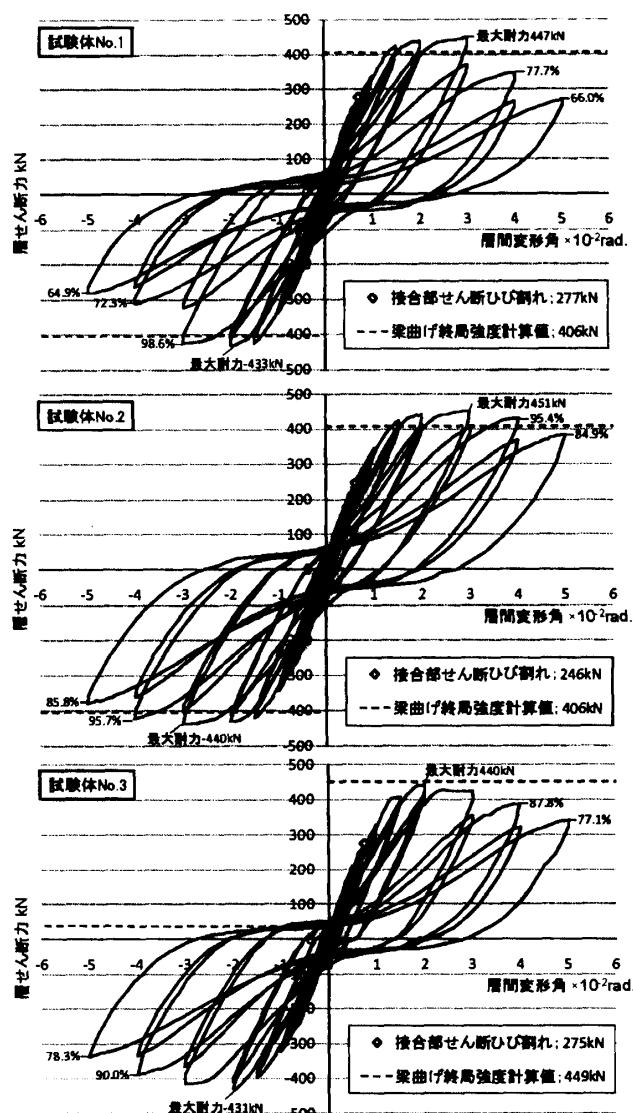


図-8 層せん断力-層間変形角関係

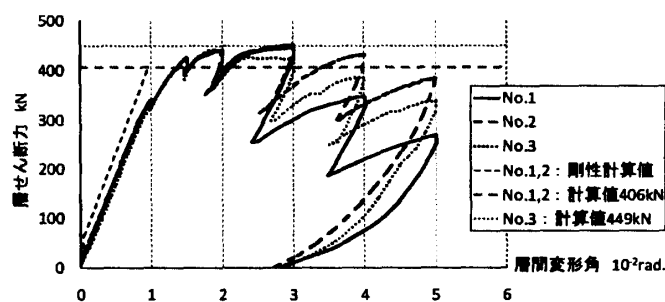


図-9 包絡線

表-4 実験値-計算値比較

(kN)	試験体	No.1	No.2	No.3
層	最大耐力(正)	447	451	440
	層間変形角	3.0%	3.0%	1.9%
	最大耐力(負)	433	440	431
	層間変形角	-2.0%	-3.0%	-2.0%
梁	計算値	64	64	64
	曲げひび割れ	72(1.13)	62(0.97)	61(0.95)
	計算値	406	406	449
	$\frac{Q_{0.05u}}{Q_{0.05c}}$	447(1.10)	451(1.11)	440(0.98)
柱	計算値	791		
	$\frac{Q_{0.05u}}{Q_{0.05c}}$	447(0.57)	451(0.57)	440(0.56)
接合部	計算値	1829		
	$\frac{V_{0.05u}}{V_{0.05c}}$	1309(0.72)	1305(0.71)	1449(0.79)

3.4 試験体の部位の変形割合

試験体No.1とNo.2の各変形角の部位変形割合を図-11に示す。両試験体ともに梁曲げ降伏先行型であり、梁主筋降伏が始まった $R=1/66\text{rad}$ 以降、ともに梁の変形割合が緩やかに上昇しており、試験体No.1,2では梁曲げ破壊が進行していると考えられる。変形割合をみると、両試験体はほぼ同じ割合を保っている。このことから、接合部に機械式継手を設けた場合でも通し配筋と同様の変形割合を示し、同じ梁曲げ降伏型の破壊形式となっていたことが分かる。

3.5 接合部内の横補強筋歪についての検討

試験体接合部内横補強筋の各層間変形角の歪分布を図-13に示す。各試験体とも変形が大きくなるにつれて概ね横補強筋の歪も大きくなっていった。試験体No.1は変形が進むにつれ、横補強筋の歪が徐々に増えている。試験体No.2では、より歪の増大が顕著に表れており $R=1/33\text{rad}$ 時に降伏歪を超えていた。No.2では、 $R=1/100 \sim 1/33\text{rad}$ にかけても層せん断力が増加し、同様に横補強筋の応力も増加していった。つまり $R=1/50\text{rad}$ を超える大変形でも接合部内梁主筋の付着力が確保され、横補強筋も有効に働いていたと考えられる(図-14)。逆に試験体No.3では $R=1/50\text{rad}$ 時から歪の値は増えていなかった。No.3は $R=1/50\text{rad}$ で最大耐力に達して以降、継手端付近の破壊が進んでいった。試験体No.2に対して、No.3は機械式継手寸法が接合部寸法に対して大きいこともあり、横補強筋の効果があまり得られず、継手端の損傷が進行していったと考えられる。

よって、試験体No.3は接合部横補強筋位置に対し継手端が外寄りであったことが、No.2の継手試験体とは異なる破壊性状を引き起こしたと考えられる(図-14)。

3.6 梁主筋の引張り力分布

図-15に各試験体の正加力 $R=1/400 \sim 1/66\text{rad}$ 時の梁上端筋中央の接合部付近の引張り力分布を示す。材料試験で得た継手引張試験の結果を用いて、継手中央の歪から継手応力を算出した。各試験体ともに梁端での値が大きく、各変形角で梁端付近の引張力が最も大きい値を示している。試験体No.1,2はともに $R=1/66\text{rad}$ 時にD19梁主筋の降伏強度となった。試験体No.3ではD25梁主筋の降伏強度は310kNほどだが、 $R=1/66\text{rad}$ 時でも260kNだった。

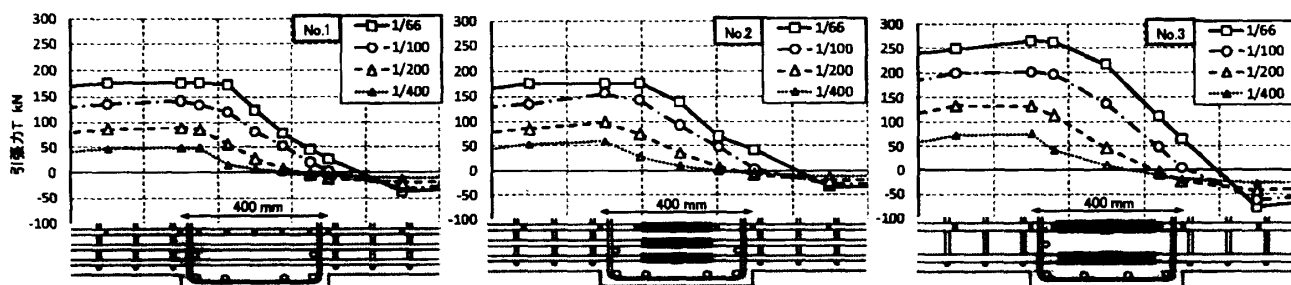


図-15 梁主筋の引張り力分布

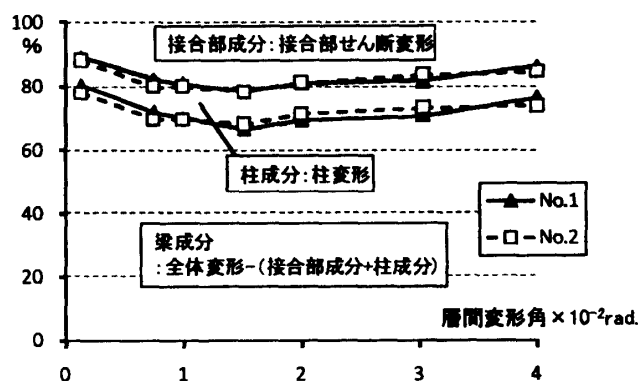


図-11 各部位の変形成分割合

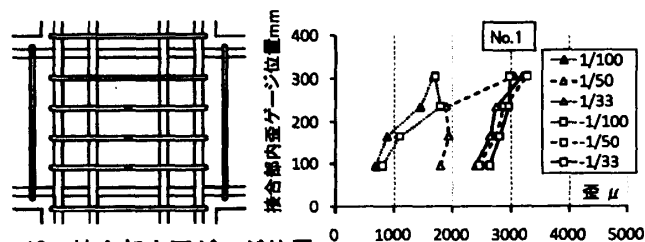


図-12 接合部内歪ゲージ位置

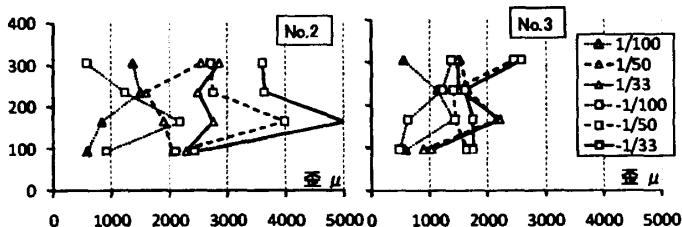


図-13 接合部内横補強筋歪分布

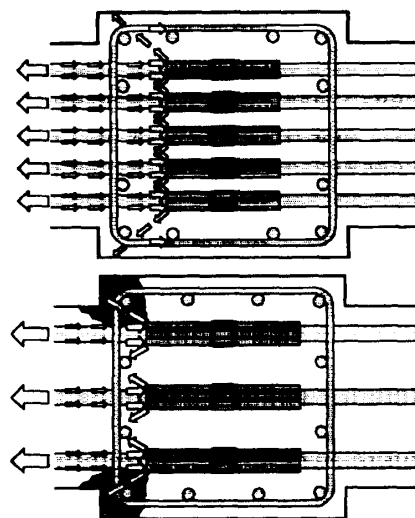


図-14 機械式継手を介した力の伝達イメージ

3.7 付着応力度の検討

図-16に各試験体の接合部付近の梁上端筋の各平均付着応力度を示す。付着応力度は式-1の通り、各歪ゲージ区間の応力の差と梁主筋表面積から算出した。ただし、継手部表面積についても梁主筋表面積と同様と仮定した。各試験体ともに層間変形が進むにつれて接合部内梁主筋の付着劣化が徐々に進行し、付着応力度の最大点が梁端の危険断面から接合部内へ移動していった。

$$\text{平均付着応力度} \quad \tau = \frac{(T_1 - T_2)}{\psi \cdot l} \quad (N/mm^2) \quad \text{式-1}$$

ψ : 主筋周長

R=1/400rad.時では、試験体No.1~3で梁端もしくは少し接合部内に入った位置で付着応力度が最大となっていた。この時は各試験体とも大きな差は見られなかった。R=1/200rad.時になると、付着応力度の最大位置がより接合部内に入り込んで接合部中心のわずかに左の位置当たりになっていた。この時点から試験体ごとの差が出始めており、試験体No.3の右梁の梁端での付着応力度が他の2体の試験体に比べ大きい値となった。これは試験体No.3の接合部内の付着劣化がより早く進行しているためと考えられる。試験体No.1と同じ梁主筋径に機械式継手を用いているNo.2では、ほぼ同じ付着応力度を示しているため同程度の早さで付着劣化が進行していたことが分かる。梁上端筋が降伏し始めた1/66rad.時にはその傾向がより顕著に表れている。試験体No.1とNo.2では接合部内の中心よりわずかに右付近の付着応力度の値が大きく、梁主筋の右側へいくにつれて値は小さくなっていた。No.2では継手左の支圧が劣化した後も継手右の値が大きく、付着力が保持できていた。しかし、試験体No.3では接合部内中央から右梁へかけての範囲で付着応力度が大きくなっていた。これから接合部内の付着劣化が進行し、接合部内の付着力だけでは足りず、右梁部の梁主筋でも大きな付着力を負担していたと考えられる。

4. まとめ

本研究によって得られた結論を以下に示す。

- 1) 高強度梁主筋を使ったため各試験体ともに降伏変形角1/66rad.となり菅野式による降伏変形と比べ、大きくなった。R=1/50rad.までの変形においては、十字型接合部内の梁主筋に機械式継手を用いた試験体No.2の場合にも通し配筋試験体No.1とほぼ同じ層せん断力-層間変形角関係を示した。また、等価粘性減衰定数、梁主筋の接合部内の付着においても、通し配筋試験体とほぼ同等の性能であった。
- 2) 層間変形角1/33rad.以降の大変形では、機械式継手のある試験体No.2は最大耐力以降の耐力低下が小さく層間変形角1/20rad.でも高い耐力を維持した。よって、本実験の範囲では大変形において通し配筋試験体

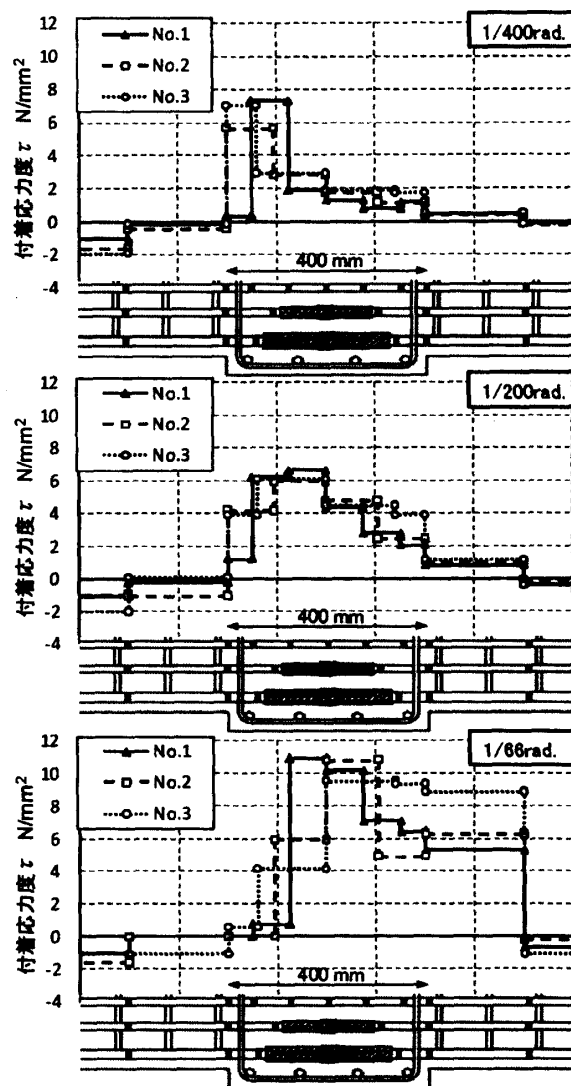


図-16 付着応力度分布

No.1と比べて、機械式継手のある試験体No.2の方が良い性能を示したといえる。

- 3) 付着破壊先行型に設定し機械式継手を用いた試験体No.3は、層間変形角1/50rad.での最大耐力が終局耐力の計算値に届かなかった。R=1/33rad.以降も継手端での大きなひび割れや柱のかぶりコンクリートの剥落などの他の試験体と異なる損傷が目立った。梁主筋の付着力が不足していたことに加え、接合部寸法に対し過大な継手寸法であったことがこれらの破壊性状の要因であると考えられる。

謝辞

本研究に際して、鉄筋や機械式継手などの材料を提供して戴きました東京鉄鋼(株)に対して謝意を表します。

参考文献

- 1) 越路正人, 阿部康晴, 高谷真次, 丸田誠: フリージョイント機械式継手を柱梁接合部に用いた骨組の構造性能に関する実験的研究: 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海) pp.567-570, 2003.9
- 2) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説, 2001.9